

日立造船(株) 正 ○ 巻 幡 敏 秋
 日立造船(株) 与 □ 正 敏

1. 緒 言

長大橋や超高煙突などの大型構造物の出現に伴ない、多円筒で構成される構造形式が多く採用される傾向にある。

これら大型構造物に作用する流体力の推定は多円筒で形成されるために個々の円筒からの干渉があり、極めて複雑である。多円筒構造物に加わる流体力は静的なものと同振動現象を発生させる動的なものがあり、静的な流体力については2~3の実験的研究がなされている。^{(1)~(4)} しかしながら、動的な流体力については1円筒構造物を除いては極めて乏しい現状である。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

この報告は弾性的に支持された2自由度系の2次元模型を用いた風洞実験から多円筒構造物に加わる動的な空気力を算出し、構造形式、風向による動的空気力、共振風速などについての一考察を試みたものである。

2. 実験装置とその方法

多円筒構造系の動的空気力を求めるために風洞内(使用した風洞はエッフェル型式で、Test Section 1.0 x 0.8 m)に、図1に示すような2次元剛模型(材質は桧で表面はラッカー仕上げされたもの)を8本のコイルバネで撓みと振りの2自由度の振動現象が生じるように支持した。また、2次元剛模型の振動現象は接触型変位計によって検出した。

この実験に使用した構造形式は主として超高煙突に採用されている多円筒構造物であって、多円筒の配列および個々の円筒間隔など実構造物にほぼ相似なものが計画されている。使用した模型の主要寸法、実験時の風向および振動特性など表1、2に示す。

表1、2にも示してあるように、2円筒構造系を除いた、1円筒、3円筒および4円筒構造系については円筒のみと円筒と鉄筒とを組合せた複合体としての風洞実験も実施している。

表2に各模型の振動特性が示してあるが、 $V=0$ (無風時)のときの振り振動数と撓み振動数との比は $f_{\alpha 0}/f_{h 0} \cong 1.0$ であって、実験時の流れのReynolds数($Re = Vd_0/\nu$ 、 d_0 = 円筒径)は $Re \cong 0.1 \sim 1 \times 10^5$ の範囲である。

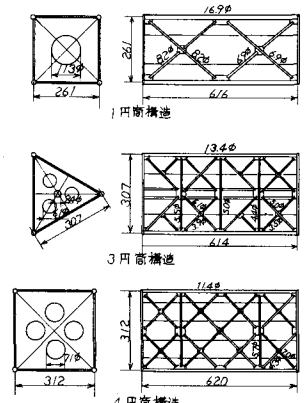


図1 多円筒構造系の供試体

表1 供試体の実験状態

供試体模型	風向(α)	記号	円筒径(d_0)	鉄塔径(d_T)	l/d_0	充実率(n)
1円筒構造	—	1D	11.3cm	なし	—	—
	0°	1DT-0	11.3	3.4cm	—	0.661
	20°	1DT-20	11.3	3.4	—	0.661
2円筒構造	45°	1DT-45	11.3	3.4	—	0.661
	0°	2D-0	11.5cm	なし	1.14	—
	45°	2D-45	11.5	なし	1.14	—
3円筒構造	90°	2D-90	11.5	なし	1.14	—
	0°	3D-0	6.1cm	なし	1.62	—
	90°	3D-90	6.1	なし	1.62	—
4円筒構造	-90°	3D(-90)	6.1	なし	1.62	—
	0°	3DT-0	6.1	1.4cm	1.62	0.792
	90°	3DT-90	6.1	1.4	1.62	0.792
4円筒構造	-90°	3DT(-90)	6.1	1.4	1.62	0.792
	0°	4D-0	7.1cm	なし	1.38	—
	20°	4D-20	7.1	なし	1.38	—
	45°	4D-45	7.1	なし	1.38	—
	0°	4DT-0	7.1	1.1cm	1.38	0.836
4円筒構造	20°	4DT-20	7.1	1.1	1.38	0.836
	45°	4DT-45	7.1	1.1	1.38	0.836

3. 実験結果とその考察

表2に示してあるように2次元剛模型は振りと捻みの振動数比が $f_{d0}/f_{h0} = 1.0$ となるように支持されているが、有風時の振動現象は捻み振動が卓越していた。

円筒構造物に作用する動的空気力は強制振動法によって算出するか、あるいは構造物の応答から算出するかの2つの解析方法が考えられる。この報告では後者の方法に従って動的空気力を算出し、強制振動法で得られた結果との比較も試みた。

2次元剛模型に加わる動的空気力は構造系に作用する空気力が変位、速度などに線形である場合の振動方程式を用いて算出することができる。なお多円筒構造系では実験結果に従えば捻みと振りの連成はなく、捻みだけの1自由度振動系としての解析となる。

振動体の質量を M (単位長さ当り)、 $V=0$ のときの振動体の振動数を f_{h0} 、振動体の粘性係数を C (構造系について C_s 、空気力系について C_a)、振動体のバネ定数を K (構造系について K_s 、空気力系について K_a)、 $V \neq 0$ のときの振動体の振動数を f_h 、振動変位を X_h 、円筒の径を d_0 、円筒の数を N 、空気の密度を ρ 、風速を V とすれば、

$$--- M \ddot{X}_h + C_s \dot{X}_h + K_s X_h = F e^{i(2\pi f_h)t} \quad \text{----- (1)}$$

$$--- F \equiv \frac{\rho}{2} V^2 C_L d_0 = C_a \dot{X}_h + K_a X_h \quad \text{----- (2)}$$

(1)(2)式から

$$--- \ddot{X}_h + 2\epsilon_s(2\pi f_{h0}) \left\{ 1 - \left(\frac{\epsilon_a}{\epsilon_s} \frac{f_h}{f_{h0}} \right) \right\} \dot{X}_h + (2\pi f_h)^2 X_h = 0 \quad \text{----- (3)}$$

振動現象が定常である場合は(3)式で $\epsilon_s f_{h0} = \epsilon_a f_h$ とおけるので、(2)式の X_h 、 \dot{X}_h は(4)式のようになり、これを(2)式に代入し、 $C_L (= \sqrt{C_L^2})$ について解けば(5)(6)式が得られる。

$$--- X_h = X_h e^{i(2\pi f_h)t}, \quad \dot{X}_h = i(2\pi f_h) X_h \quad \text{----- (4)}$$

$$--- C_L = C_{LR} + i C_{LI} \quad \text{----- (5)}$$

$$--- \sqrt{C_L^2} = \left\{ (C_{LR})^2 + (C_{LI})^2 \right\}^{1/2} \quad \text{----- (6)}$$

こゝに、

$$--- C_s/M = 2\epsilon_s(2\pi f_{h0}), \quad C_a/M = 2\epsilon_a(2\pi f_h), \quad (K_s - K_a)/M = (2\pi f_h)^2, \quad K_s/M = (2\pi f_{h0})^2$$

$$--- C_{LR} = (2\pi)^3 \mu (f_{h0} d_0 / V)^2 (X_h / d_0) \left\{ 1 - (f_h / f_{h0})^2 \right\}$$

$$--- C_{LI} = (2\pi)^3 \mu (f_{h0} d_0 / V)^2 (X_h / d_0) (g_{hs} (f_h / f_{h0}))$$

$$--- \mu = M / N \pi \rho d_0^2, \quad g_{hs} = \delta_{hs} / \pi, \quad \delta_{hs} = \log_e \left\{ (X_h)_n / (X_h)_{n+1} \right\}$$

弾性的に支持された2次元の多円筒構造系の振動特性(f_{h0} , f_h , g_{hs})と定常的な振幅(X_h)および(6)式とを用いて、各構造系に加わる動的な空気力係数($\sqrt{C_L^2}$)を求めた。

3. 1 多円筒構造系の空気力について

円筒のみで構成される構造形式と動的空気力係数($\sqrt{C_L^2}$)とStrouhal数($f_{h0} d_0 / V$)とを示すと図2~5となる。図2は1円筒構造系のもので、 $f_{h0} d_0 / V \cong 0.2$ で $(\sqrt{C_L^2})_{\max} \cong 0.43$ が得られる。

表2 供試体の振動特性

供試模型	記号	μg_{hs}	f_{h0}/f_h	$Re(=Vd_0) \times 10^5$
1円筒構造	1D	0.306	1.03	0.11~1.17
	1DT-0	0.387	1.02	0.09~0.82
	1DT-20	0.406	1.02	0.10~1.05
	1DT-45	0.307	1.01	0.10~1.04
2円筒構造	2D-0	0.172	1.00	0.10~0.47
	2D-45	0.177	1.00	0.70~1.18
	2D-90	0.185	1.00	0.10~0.94
3円筒構造	3D-0	0.443	0.98	0.07~0.49
	3D-90	0.443	0.96	0.07~0.39
	3D(-90)	0.433	0.97	0.06~0.49
	3DT-0	0.565	0.99	0.07~0.55
	3DT-90	0.533	0.98	0.07~0.50
4円筒構造	3DT(-90)	0.544	0.99	0.07~0.39
	4D-0	0.275	0.99	0.06~0.69
	4D-20	0.300	0.98	0.07~0.68
	4D-45	0.275	0.98	0.07~0.62
	4DT-0	0.367	1.00	0.07~0.54
	4DT-20	0.376	1.00	0.06~0.49
	4DT-45	0.416	1.01	0.07~0.45

図3は2円筒構造系について示したもので、風向 $\alpha=0^\circ$ のときは $f_{ho}d_0/v \cong 0.18$ で $(\sqrt{C_L^2})_{max} \cong 0.13$ 、 $\alpha=45^\circ$ のときは $f_{ho}d_0/v \cong 0.16$ で $(\sqrt{C_L^2})_{max} \cong 0.40$ 、 $\alpha=90^\circ$ のときは $f_{ho}d_0/v \cong 0.12$ で $(\sqrt{C_L^2})_{max} \cong 0.44$ が得られ、 $\alpha=0^\circ$ に比べ $\alpha=45^\circ$ 、 90° の場合の方が、大きな動的空気力が作用することが認められる。図4は3円筒構造系のもので、 $f_{ho}d_0/v \cong 0.065$ で $(\sqrt{C_L^2})_{max}$ となり、 $(\sqrt{C_L^2})_{max}$ は風向がそれぞれ 0° 、 90° 、 -90° のとき約0.22、0.31、0.27が得られ、3円筒構造系では風向による動的空気力の差はあまり大きくない。図5は4円筒構造系のもので、風向 $\alpha=45^\circ$ のときに $f_{ho}d_0/v \cong 0.07$ で $(\sqrt{C_L^2})_{max} \cong 0.33$ が得られ、 $\alpha=0^\circ$ 、 20° では $(\sqrt{C_L^2})$ の顕著なピークは認められなく、 $\alpha=45^\circ$ で大きな動的空気力が作用することを示している。

$(\sqrt{C_L^2})_{max}$ となるStrouhal数($f_{ho}d_0/v$ 、 d_0 =多円筒構造系の投影径)と多円筒構造形式との関係を図6に示す。2円筒構造系の $\alpha=45^\circ$ 、 90° 以外は投影径 d_0 でのStrouhal数は $f_{ho}d_0/v \cong 0.18 \sim 0.22$ の範囲内において、空気力学的に投影径 d_0 を有する1円筒構造系と相似のようである。また多円筒構造系を投影径 d_0 を有する系に仮定した場合の動的空気力係数 $N(\sqrt{C_L^2})_{max}$ は1円筒系で0.43、2円筒系で0.88、3円筒系で0.93、4円筒系で1.32のようであり、円筒の数 N が増えるほど $N(\sqrt{C_L^2})_{max}$ は増大する傾向がある。

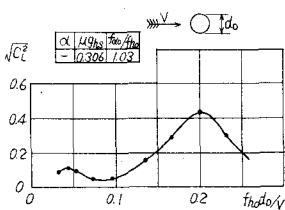


図2 1円筒構造系の動的空気力係数

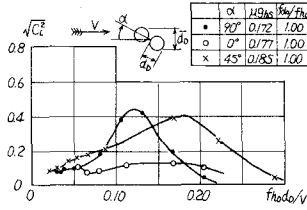


図3 2円筒構造系の動的空気力係数

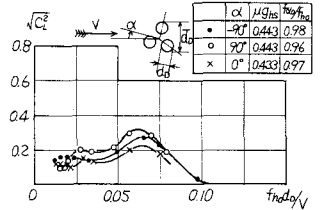


図4 3円筒構造系の動的空気力係数

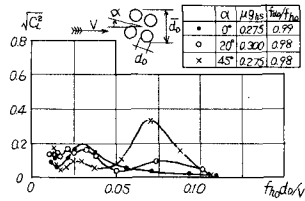


図5 4円筒構造系の動的空気力係数

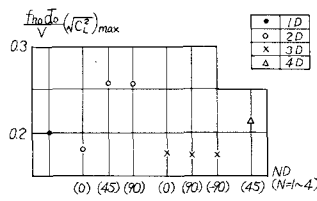


図6 多円筒構造系のStrouhal数($f_{ho}d_0/v$)

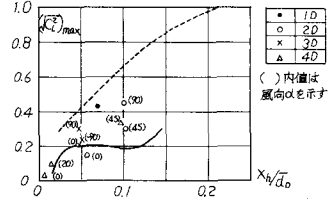


図7 $(\sqrt{C_L^2})_{max}$ と X_h/d_0 との関係

弾性的に支持された2次元模型から算出される動的空気力係数 $(\sqrt{C_L^2})_{max}$ と1円筒構造系を対象に強制振動法⁽⁵⁾によって得られた $(\sqrt{C_L^2})_{max}$ と比較したのが図7であって、(●, ○, ×, △)印および実線⁽⁷⁾(実験結果と(6)式を用いて算出)で示したのが前者の方法から求めたもの、点線が後者の方法によって求められたものである。両方法からも動的空気力は振動変位の関数であることが認められる。両者から算出される動的空気力はほぼ満足される結果(点線と●との比較)となっている。なお点線と●印は $L/d_0 = \infty$ (2次元)、実線は $L/d_0 = 10$ (3次元)の結果についてのもので、動的空気力係数も静的空気力係数と同様3次元影響を有する構造系の方が小さくなるようである。

3.2 多円筒と鉄塔との複合体の空気力について

多円筒構造系と多円筒と鉄塔との複合体で構成される構造系の空気力についての比較を行なうために、3.1項と同様な実験結果の解析を試みた。

1円筒, 3円筒および4円筒と鉄塔との複合体の動的空気力係数($\sqrt{C_D^2}$)を示すと図8~10が得られる。複合体の動的空気力は充実率 $n = A_D + A_T/A_0$ による影響が大きいという結果も報告されている⁽⁶⁾が、本実験に用いた充実率のものにおいては多円筒構造系のものに比べ、動的空気力は小さいことが認められた。1~4円筒と鉄塔との複合体の動的空気力は多円筒構造系の約 $1/2$ という結果になっているが ($\sqrt{C_D^2}$)_{max} となる Strouhal 数 ($f_{ho}d_0/v$) は複合体も多円筒構造系もほぼ同じ値である。

これらのことから複合体であっても、円筒が構造系の耐風特性に支配的な影響を与えていること、鉄塔が円筒廻りの流れをある程度乱し動的空気力の発生を弱めていることなどがうかがえる。なお、高い風速時(第2のピークを示す領域)に対しては両者の差は殆んど認められず、ほぼ同じような動的空気力が作用していることを示している。

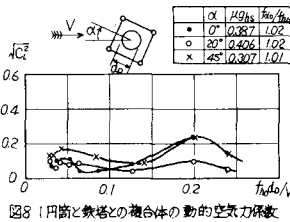


図8 1円筒と鉄塔との複合体の動的空気力係数

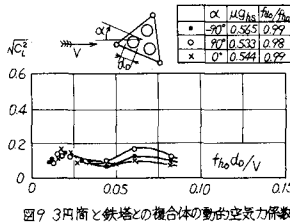


図9 3円筒と鉄塔との複合体の動的空気力係数

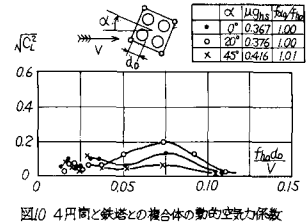


図10 4円筒と鉄塔との複合体の動的空気力係数

4. 結言

多円筒および多円塔と鉄塔の複合体で構成される構造系に作用する空気力を算出し、それぞれの構成形式に対する耐風特性を明白にした。

(1) 多円筒構造系で ($\sqrt{C_D^2}$)_{max} となる Strouhal 数 ($f_{ho}\bar{d}_0/v$, \bar{d}_0 = 多円筒の投影径) は2円筒構造系の $\alpha = 45^\circ, 90^\circ$ を除けば ($f_{ho}\bar{d}_0/v$) $\cong 0.18 \sim 0.22$ となり、空気力学的に投影径 \bar{d}_0 を有する1円筒構造系とほぼ相似となっている。

(2) 多円筒構造系の動的空気力係数 $N(\sqrt{C_D^2})_{max}$ は円筒の数 N の増加に従って、 γ 増大する傾向にある。

(3) 多円筒と鉄塔との複合体で構成される構造形式の動的空気力 ($\sqrt{C_D^2}$)_{max} は鉄塔の干渉によって約 $1/2$ に低下する。しかしながら ($\sqrt{C_D^2}$)_{max} となる Strouhal 数 ($f_{ho}d_0/v$) は多円筒のみの構造系とほぼ等しく、円筒が複合体構造系の耐風性に支配的な影響を与えていることが認められる。

参考文献

- (1) S.F. Hoerner ; Fluid Dynamic Drag (1958)
- (2) 永井 他 ; 開水路流れの中の円柱の干渉 土木学会論文集 第196号 (1971)
- (3) N. Suzuki 他 ; Aerodynamic Forces Acting on Circular Cylinders Arranged in a Longitudinal Row '71 Wind Effects on Buildings and Structures
- (4) 坪山 他 ; 多筒身煙突 他の風圧力に関する実験 川崎技報 43号
- (5) 釜口 他 ; 振動円柱の非定常空気力に関する研究 '70 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム
- (6) M. Iroke 他 ; Wind Induced Vibration of a Stack with Supporting Tower '71 Wind Effects on Buildings and Structures
- (7) L.R. Wootton ; The Oscillation of Model Circular Stacks due to Vortex Shedding at Reynolds Numbers from 10^5 to 3×10^6 NPL Aero Report 1267 June '68